

CENTRO DE ANALISIS Y PREDICCION

Notas de Meteorología Sinoptica

NOTA N-18

UN EJERCICIO DE PREDICCION NUMERICA SOBRE LA TOPOGRAFIA  
DE 500 mbs.

MADRID  
Abril de 1965

## UN EJERCICIO DE PREDICCIÓN NUMÉRICA SOBRE LA TOPOGRAFÍA DE 500 MILIBARES (6)

### El Modelo Barotrópico

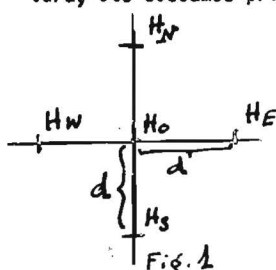
Se ha visto en la NOTA 11 como pueden enunciarse las ecuaciones clásicas del movimiento atmosférico en función de la vorticidad. Esencialmente, el método de calcular predicciones de las alturas sobre una topografía consiste en: a) calcular la vorticidad absoluta sobre el mapa actual, b) de ella obtener la velocidad instantánea de cambio de la vorticidad relativa en numerosos puntos por advención de la vorticidad absoluta con el viento geostrófico, y después c) por intermedio de la relación de la tendencia instantánea de la altura con la velocidad instantánea de cambio de la vorticidad relativa, calcular las tendencias instantáneas de la altura. Estas tendencias son después usadas para calcular las alturas para un corto periodo de tiempo, por ejemplo para media hora más tarde. Las nuevas alturas son después usadas para repetir el proceso y esto se hace 48 veces (en nuestro ejemplo) para obtener una predicción para 24 horas este proceso de repetición se llama "iteración".

### Discusión general del procedimiento

Antes de empezar con este ejercicio se ofrece la siguiente discusión como una orientación de los problemas prácticos que intervienen. Los detalles del procedimiento se dan más adelante.

1.- El primer paso del procedimiento consiste en colocar una red de puntos, equidistantes entre sí 300 Kms en una red cuadrada. En este ejercicio se despreciará los cambios en latitud, en la escala del mapa y curvatura de la Tierra por tratarse de una red relativamente pequeña también se desprecia las variaciones en g, que se supone 980 cm/s.

2.- Partiendo de la relación  $\zeta = \frac{g}{f} \nabla^2 H$  donde  $\zeta$  es la componente vertical de la <sup>vorticidad relativa</sup> velocidad, H es la altura, etc deseamos primeramente calcular los valores para cada punto de la red. Según a figura 1 tenemos



$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial H}{\partial x} \approx \frac{\Delta H}{\Delta x}; \quad \frac{\partial H}{\partial y} \approx \frac{\Delta H}{\Delta y}; \quad \Delta x = \Delta y = d$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{d^2} [H_N + H_E + H_S + H_W - 4H_0]$$

La línea vertical en el símbolo indica que se calcula la placiana por diferencias finitas. En realidad, en nuestro caso se obtienen los valores de  $d^2 \nabla^2 H$  esto es  $(H_N + H_E + H_S + H_W - 4H_0)$ .

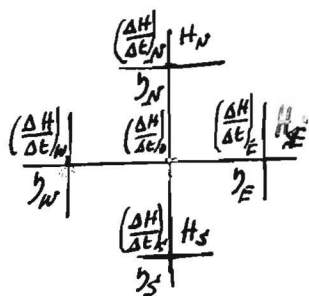


Fig. 2

3.- Los valores de  $d^2 \nabla^2 H$  se usan para obtener la vorticidad absoluta  $\eta$  en un gráfico que la da en función de  $\zeta$ .  $\eta = \zeta + f$

La anotación para la discusión siguiente se da en la fig. 2. Deseamos ahora calcular la velocidad instantánea de cambio de la vorticidad relativa en cada punto de la red. Esto se hizo en la Nota 11 por advención gráfica de las vorticidades relativas iniciales con las direcciones y velocidades iniciales del viento geostrófico, haciendo correcciones cualitativas del movimiento sobre la topografía para los intervalos de tiempo correspondientes. El calculador electrónico, naturalmente, no puede hacer esto y se debe recurrir a métodos puramente numéricos (que requiere también el que el intervalo de tiempo deba ser más pequeño porque la máquina no puede hacer las correcciones cualitativas descritas anteriormente). Substancialmente la misma cosa que con la advención de la vorticidad absoluta con el viento geostrófico se realiza con la ecuación:

$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\nabla \cdot \nabla \eta$ ; donde  $-\nabla \cdot \nabla \eta = -(u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y})$ ;  $u = -\frac{g}{f} \frac{\partial H}{\partial y}$ ;  $v = +\frac{g}{f} \frac{\partial H}{\partial x}$ ;

$$-\nabla \cdot \nabla \eta = \left( \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{g}{f}$$

(la expresión entre paréntesis es el Jacobiano.)

Introduciendo la aproximación en diferencias finitas:  $\Delta x = \Delta y = d$ ;  $\frac{\Delta H}{\Delta x} = (H_N - H_S) \frac{1}{2d}$ ;  $\frac{\Delta \eta}{\Delta x} = (\eta_E - \eta_W) \frac{1}{2d}$   
 $\frac{\Delta H}{\Delta x} = (H_E - H_W) \frac{1}{2d}$ ;  $\frac{\Delta \eta}{\Delta y} = (\eta_N - \eta_S) \frac{1}{2d}$   
 y poniendo  $[(H_N - H_S)(\eta_E - \eta_W) - (H_E - H_W)(\eta_N - \eta_S)] = W$  resulta:  $\frac{\Delta \zeta}{\Delta t} = \frac{g}{4d^2 f} W$   
 y se calcula  $W$  para los distintos puntos de la red.

5.- Deseamos calcular  $\frac{\Delta H}{\Delta t}$  en cada punto de la red, nótese que  $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{g}{f} \nabla^2 \eta$  y  $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -W \cdot \nabla^2 \eta$  ; 0  
 $\frac{\Delta \zeta}{\Delta t} = \frac{g}{f} \nabla^2 \left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right) = \frac{g}{f d^2} \left[ \left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right)_N + \left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right)_E + \left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right)_S + \left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right)_W - 4 \left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right) \right]$  y  $\frac{\Delta \zeta}{\Delta t} = \frac{g}{4d^2 f} W$   
 poniendo  $\left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right) = \frac{Z}{4}$ , entonces es  $\frac{g}{4d^2 f} W = \frac{g}{4d^2 f} (Z_N + Z_E + Z_S + Z_W - 4Z_0)$  ;  $W = 4(Z_N + Z_E + Z_S + Z_W - 4Z_0)$   
 Haciendo  $4Z_0 = Z_N + Z_E + Z_S + Z_W - 4Z_0 - W = 0$  y podemos encontrar los valores de  $Z$  por relación (como se explica más adelante) poniendo  $Z_N + Z_E + Z_S + Z_W - 4Z_0 - W = R \approx 0$

6.- Después de encontrar los valores de  $Z$  por relajación, deseamos obtener los valores de  $\frac{\Delta H}{\Delta t}$  para 12 horas.  $\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{1}{4} Z$  Viene dado en pies/s. de modo que debe multiplicarse por 43.200 segundos para obtener el cambio en 12 horas  $z_{12 \text{ horas}} = \frac{43200}{4} Z = 10,8 \times 10^3 Z$

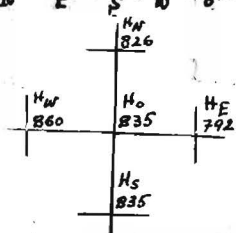
### PROCEDIMIENTO.

Se puede recordar que se trata del mapa a 03z del 25 de Noviembre de 1950 (sobre Norteamérica) con una famosa tormenta que provocó algunas dificultades. Se ha tomado una red de puntos separados por 300 kms, esta red de puntos con los valores de las alturas interpoladas es el punto de partida para la predicción numérica. Únicamente se usan los valores observados de las alturas de la superficie de 500 mb, no siendo necesario más datos.

1.- El primer paso en el cálculo se ~~de~~ <sup>usará</sup> la hoja reticular núm. 1, que contiene los valores de las alturas en los puntos reticulares obtenidos por interpolación en la topografía analizada. La altura en cada punto (en decenas de pies y suprimiendo la cifra de los millares) se coloca en el cuadrante superior derecho de cada punto. En el cuadrante inferior derecho se escribe la latitud del punto en grados enteros. Estos valores únicamente se dan para los puntos interiores porque no son necesarios en los puntos de los bordes del retículo.

Sobre todas las hojas reticulares de este ejercicio, se <sup>me</sup> numeran las columnas del retículo (verticales) y las ~~filas~~ <sup>filas</sup> del retículo (horizontales). Cada punto reticular se representa así por un par de números, indicando el primer número la columna y el segundo la fila, por ejemplo, el punto 3,4 indica el punto reticular de intersección de la 3ª columna y la 4ª fila.

Como se ha explicado en la discusión general, primeramente debemos calcular ~~para~~ <sup>la</sup> magnitud  $p = (H_N + H_E + H_S + H_W - 4H_0)$ . El primer punto de la red a considerar es el punto 2,2. Vemos entonces que es demodo que tenemos:  $826 + 860 + 835 + 792 - 4 \times 835 = -27$  (que representan -270 pies) La cifra -27 se escribe en el cuadrante superior izquierdo de cada punto reticular. Algunos encuentran más sencillo restar  $H$  de cada una de las cuatro alturas y sumar las diferencias; así:  $(H_W - H_0) + (H_N - H_0) + (H_E - H_0) + (H_S - H_0)$  para el punto 2,2 será:  $(-25) + (-9) + (-43) + 0 = -27$  que en la práctica puede hacerse mentalmente.



El cálculo se hace para todos los puntos ~~en~~ <sup>de</sup> interiores de la red sobre la hoja reticular N°1 antes de proceder al paso siguiente. Para comprobar que el cálculo se realiza correctamente, se imprimen los valores de los puntos 3,3 y 4,4 en dicha hoja reticular.

Como que la exactitud de cada etapa subsiguiente depende de cada una de las precedentes, y resultara muy laborioso el comprobarlos de nuevo; después de completar el cálculo de la etapa 1, se debe cotejar el resultado con la hoja de verificación. Por supuesto, se puede ahorrar todo el trabajo partiendo de ella, pero es conveniente realizar todo el cálculo para tener una comprensión completa del proceso. El material de comprobación se da con objeto de tener una guía en el mismo.

2.- Para esta segunda etapa deberá usarse la Hoja Reticular n° 1, se desea obtener los valores de la componente vertical de la vorticidad absoluta en cada punto de la red. Se recordará que la vorticidad absoluta es  $\eta = \zeta + f = \frac{g}{f d^2} p + f$ , haciendo la sustitución de los valores correspondientes de  $d=300 \text{ km}=3 \times 10^5 \times 3,281$  (pies);  $g=9,81 \times 3,281$  (pies/s²);  $\omega = 2\pi/T = 2\pi/86400$  (rad/s) resulta la fórmula

$$\eta = \frac{0,023}{\sin \varphi} p + 1,45 \sin \varphi$$

, que se puede calcular directamente con tablas trigonométricas para cada

uno de los puntos de la red, ó bien se construyen los sistemas de rectas correspondientes a cada latitud y se interpola graficamente en nuestro caso parece indicado el calculo directo. El resultado representa valores de la componente vertical de la velocidad de la vorticidad absoluta en unidades de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . El valor obtenido de la fórmula se aproximará hasta las décimas y el resultado puede comprobarse en la hoja de verificación número 1, y debe escribirse con su signo en el cuadrante inferior izquierdo, en cada uno de los puntos de la Hoja Reticular núm. 1. Para comprobación en dicha hoja se imprimen los valores calculados en los puntos 3,3 y 4,4.

En las etapas 3 a la 5 se utilizará la Hoja de Tabulación núm. 1 además de la Hoja de Reticular núm. 1 y terminará con el cálculo de la velocidad instantánea de cambio de la vorticidad absoluta en cada punto de la red en función de la advención de la vorticidad absoluta con el viento geostrofico. En la discusión general del procedimiento encontramos que la advención geostrofica de la vorticidad viene dada por la fórmula

$$\frac{\Delta \zeta}{\Delta t} = \frac{g}{4d^2 f} W \quad \text{donde } W = [(H_N - H_S)(\eta_E - \eta_N) - (H_E - H_W)(\eta_N - \eta_S)]$$

el valor de W para cada punto de la red se calculará en las próximas 6 etapas.

3.- En la etapa 3, para cada punto de la red: a) calcular  $(H_N - H_S)$  y se escribe en el espacio apropiado de la columna 2 de la Hoja de Tabulación núm. 1. b) calcular  $(\eta_N - \eta_S)$  y escribir en la columna 3 de la Hoja de Tabulación núm. 1. c) Calcular  $(H_E - H_W)$  y escribir en la columna 4 de la Hoja de Tabulación núm. 1. d) Calcular  $(\eta_E - \eta_W)$  y escribir en la columna 5 de la Hoja de Tabulación núm. 1. Como ejemplo

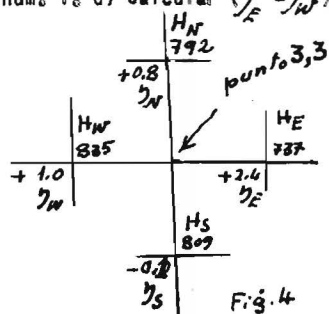


Fig. 4

en la fig. 4 se representa en punto 3,3. Así los pasos serán: a)

a)  $H_N - H_S = 792 - 809 = -17$  (en realidad, mm -170 pies), -17 se escribe en la columna 2 del punto 3,3.

b)  $\eta_N - \eta_S = 0.8 - (-0.1) = +0.9$  (en realidad,  $+0.9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) y +0.9 se escribe en la columna 3 del punto 3,3.

c)  $H_E - H_W = -98$  y se escribe en la columna 4 del punto reticular 3,3

d)  $\eta_E - \eta_W = +1.4$  y se escribe en la columna 5 del punto 3,3

Los resultados para el punto 3,6 se imprimen en la Hoja de Tabulación núm. 1 para que se pueda verificar el cálculo. Cuando las columnas 2 a 5 están completas se pueden verificar los resultados con la Hoja de Tabulación y comprobación núm. 1.

4.- La etapa 4 consiste en multiplicar el número de la columna 2 de la Hoja de Tabulación núm. 1 por el número de la columna 5 para cada punto reticular. Por ejemplo, para el punto 3,3 es  $-17 \times (1.4) = -24$ . Después se escribe este producto en la columna 6 y se continua para todos los puntos reticulares. La multiplicación puede realizarse con regla de cálculo. Las unidades de la columna 6 son  $10^{-3}$  pies/s. Los cálculos para el punto 3,6 se incluyen también en la Hoja de Tabulación para que se puedan comprobar.

5.- La etapa 5 consiste en hacer lo mismo que en la etapa 4, pero ahora multiplicando la columna 3 por la columna 4 y escribiendo el producto en la columna 7.

6.- La etapa 6 consiste en restar algebraicamente, para cada punto de la red, el núm. de la columna 7 del núm. de la columna 6 y escribir el resultado en la columna 8. Por ejemplo para el punto 3,3:  $-24 - (-88) = +64$

Los números en la columna 8 representan velocidades instantáneas del cambio de la vorticidad relativa. Sin embargo, las unidades incluyen en sus dimensiones una longitud, en otras palabras, las unidades son  $10^{-3}$  pies/s. pero la vorticidad tiene las dimensiones de  $\text{s}^{-1}$  este factor de longitud (pies) será cancelado al fin de los calculos, como se mostró en la discusión general.

7.- En la etapa 7, usaremos conjuntamente, la Hoja de Tabulación núm. 1 y la Hoja Reticular núm. 2. Las filas y las columnas en esta Hoja Reticular se numerarán análogamente a la Hoja Reticular núm. 1 de modo que se puedan identificar fácilmente los puntos reticulares. En esta etapa, copíense los números de la columna 8 en el cuadrante inferior derecho y próximos al punto apropiado sobre la Hoja Reticular núm. 2. Con objeto de simplificar el cálculo, se toman los valores de W de la columna 8 divididos por 10 y redondeados a entero. Por ejemplo, el valor 218 de la columna 8 deberá escribirse como 22. Hacer esto para todos los puntos reticulares cuyos valores se han calculado en la columna 8 de la Hoja de Tabulación núm. 1. Se observará que no hay valores para los puntos reticulares de las columnas 2 y 9 y de las filas 2 y 9. (Puntos de las columnas 1 y 10 y de las filas 1 y 10 no se incluyen en la Hoja Reticular núm. 2). Escribir ceros para todos

los puntos reticulares en las columnas 2 y 9 y filas 2 y 9, como se muestra en la Hoja Reticular número 2 para los puntos reticulares 2,2, 3,2 y 2,3. Cuando se han escrito todos los ceros, habrá un marco de ceros rodeando los puntos reticulares interiores cuyos valores se toman de la columna 8 de la Hoja de Tabulación núm. 1. En la fig. 5 se muestra el ángulo superior izquierdo de la red.

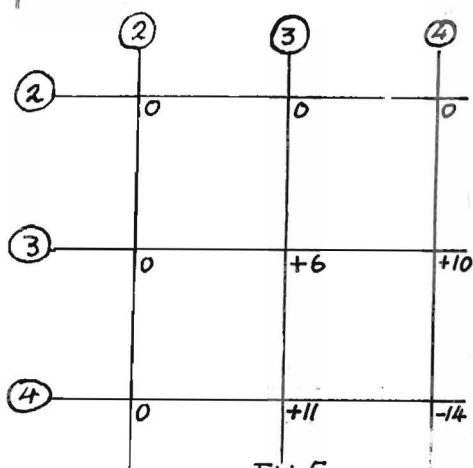


Fig. 5

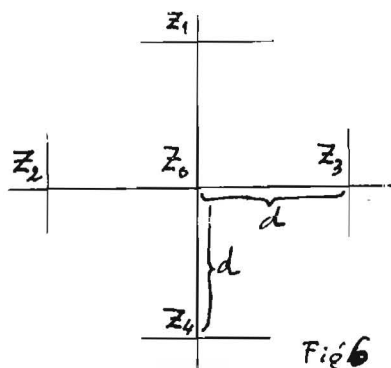


Fig. 6

8.- En esta etapa 8 se realizará el proceso de "relajación". Se trata de calcular en cada punto reticular de la Hoja Reticular núm. 2 la velocidad instantánea de cambio en altura a partir de la velocidad instantánea de cambio de la vorticidad relativa, que son los valores transcritos sobre la Hoja Reticular núm. 2 en la etapa 7 omitiendo el razonamiento matemático y físico, que puede verse en libros especializados, se dan las directrices para realizar estos cálculos numéricos. El proceso se divide en ~~dos~~ pasos que se representan por letras mayúsculas pasos A los números que se copiaron sobre la Hoja Reticular núm. 2 de la columna 8 de la Hoja de Tabulación núm. 1 son valores de la velocidad de cambio de la vorticidad en cada punto reticular. Desde ahora llamaremos "peso" (W) a la velocidad de cambio de la vorticidad. La razón para hacer esto está en que la red es análoga a una membrana elástica sujeta a un marco rectangular y tal que en cada punto de la membrana se encuentra un peso. Evidentemente, el peso en un punto reticular afecta no solamente el desplazamiento en dicho punto sino también a los desplazamientos en los puntos reticulares adyacentes. El método de relajación es análogo a un proceso por el cual todos los pesos se descuelgan de forma que la membrana se convierte en un plano horizontal. Entonces, sistemáticamente, cada gancho es soltado o relajado algo, uno cada vez para descubrir cuál es el efecto del correspondiente desplazamiento vertical que ocurren en el punto reticular en cuestión y en los puntos reticulares que lo rodean. Cuando se realiza el proceso de relajación hasta su conclusión, todos los pesos estarán en equilibrio y se conocerán el desplazamiento vertical en cada

punto reticular, el proceso es esencialmente un proceso repetido de tanteos.

La solución depende de la fórmula:  $Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 - 4Z_0 = W = R = 0$  donde las Z son desplazamientos verticales (por unidad de tiempo) en los puntos reticulares como se muestra en la fig. 6 y a los valores de R se les denomina "residuales". Los valores de Z en la ecuación anterior son, por supuesto, las tendencias instantánea de la altura que deseamos encontrar por cálculo. Para hacer esto debemos partir de un valor supuesto la suposición más sencilla, aunque evidentemente no correcta, es que todas las Z son cero. Si nosotros hacemos esta suposición se ve inmediatamente que  $R=W$ .

Paso B suponiendo que todas las Z son igual a cero escribimos el primer tanteo de las Z en el cuadrante superior izquierdo próximo a cada punto reticular y R en el cuadrante superior derecho próximo a cada punto reticular. Entonces tenemos en cada punto de la red lo indicado en la fig. 7. La forma en que queda algunas partes de la red se muestra en las figs. 8 y 9. El marco de valores cero de W permanece invariable cuando se realiza cualquier operación con los puntos interiores, en otras palabras, el marco de ceros es una estructura rígida.

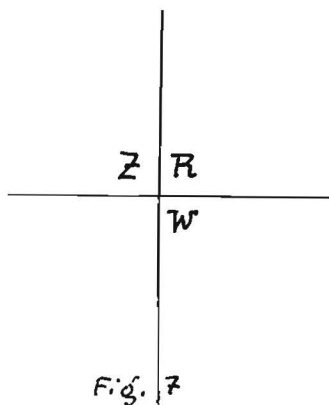


Fig. 7

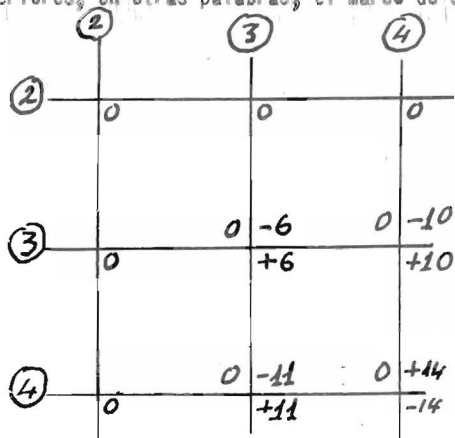


Fig. 8

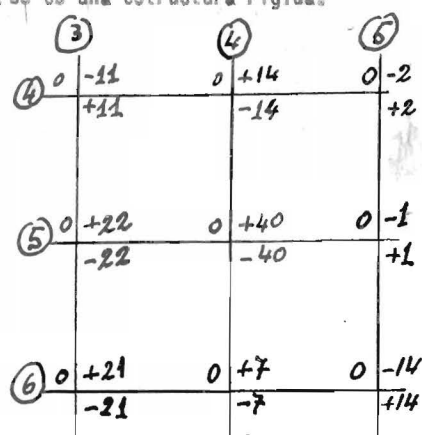


Fig. 9



Paso C. la idea en la relajación consiste en reducir el valor numérico de la residual. Para ello utilizaremos la fórmula:  $Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 - 4Z_0 = W_0 + R_0$

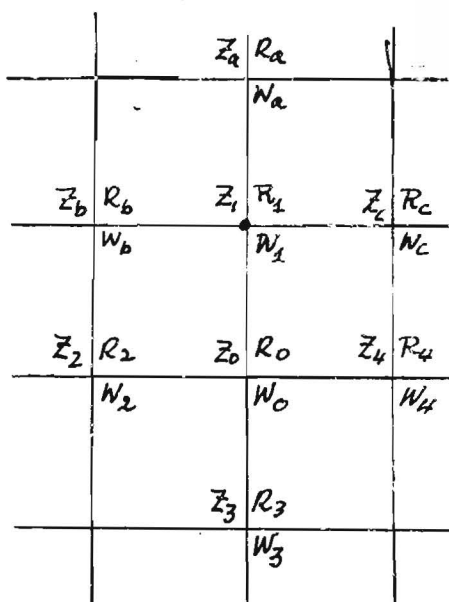


Fig. 10

si aumentamos  $Z_0$  en +1 y sustituimos en la ecuación anterior, obtenemos:  $0 + 0 + 0 + 0 - 4(1) = W_0 + R_0$ ,  $R_0 = -W_0 - 4$ , que demuestra que  $R_0$  quedó alterada en -4. ¿cómo influye esto en los residuales de los puntos de alrededor? examinemos el residual  $R_1$ , correspondiente a  $Z_1$ , por ejemplo, y tendremos (fig. 10):  $Z_1 - Z_2 + Z_0 + Z_3 - 4Z_1 = W_1 + R_1$ , y sustituyendo, recordando que hemos aumentado  $Z_0$  en +1, tendremos:  $0 + 0 + 1 + 0 - 4(0) = W_1 + R_1$ , ó  $R_1 = -W_1 - 1$  el mismo resultado se obtendría para cada uno de los puntos de alrededor. e este caso particular podemos generalizar y decir que un aumento de +1 en el desplazamiento de  $Z$  en un punto reticular central cambia los residuales en cada punto reticular en un incremento de -4 y cambia los residuales de cada uno de los cuatro puntos reticulares que lo rodean en un incremento de +1.

Realizamos ahora el proceso de relajación vease la fig. 11. Primeramente, localizaremos el residual máximo. En este caso, es +40, situado en el punto reticular 4,5. La idea es seleccionar un número para el incremento de  $Z$  aproximadamente igual a 1/4 del residual original. En este caso nosotros debemos seleccionar un incremento de  $Z = Z_{inc} = +10$ . Entonces  $R$  debería cambiarse en un factor de  $-4 \times 10$ , ó -40 el nuevo  $R$  sería  $40 - 40 = 0$  mostrando una considerable reducción como deseamos.

Sin embargo, en muchos casos, especialmente cuando los residuales que tienen el mismo signo están próximos entre sí, es ventajoso hacer una sobre-relajación, en otras palabras elegir un valor de  $Z_{inc}$  que es mayor que el valor que reduciría el residual central en una proporción óptima y forzarlo más allá de cero. Este en realidad puede reducir el número total de pasos.

En este caso, en lugar de +10, elegimos +15. Entonces el nuevo  $R$  se cambiará en  $40 - 4(15) = -20$ . Escribese el nuevo valor (+15) de  $Z_{inc}$  encima del antiguo (0 en este caso). Escribir el nuevo residual (-20) encima del antiguo (-40). Esto se muestra en (a) y (b) de la fig. 11.

Después se cambia cada uno de los residuales de alrededor en +15 (el valor de  $Z_{inc}$ ). En la fig. 11 esto se muestra como (c), donde  $15 + 22 = +37$ ; en (d) donde  $15 + 14 = +29$ ; en (e) donde  $15 - 1 = +14$ ; y en (f) donde  $15 + 7 = +22$ .

Paso B se selecciona ahora de nuevo el residual más alto esta vez es +37 en el punto reticular 3,5. incidentalmente este es un nuevo residual que acabamos de encontrar en el paso C. Ahora puede ser de nuevo aconsejable sobre-relajar de nuevo, pero veamos lo

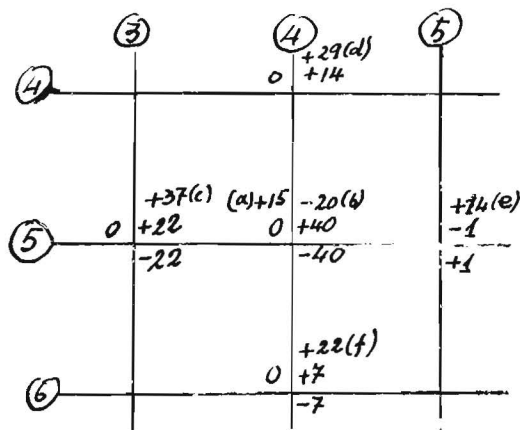


Fig. 11

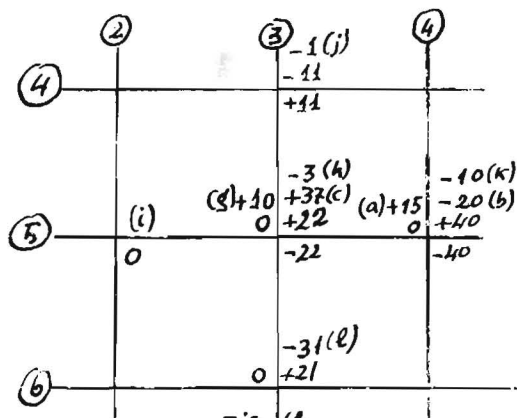


Fig. 12

que sucede si se relaja normalmente y elegimos  $Z_{inc} = 10$ . El resultado se muestra en la fig. 12. Escribimos el nuevo  $Z_{inc}$  como se muestra (g), el nuevo residual central R se indica en (h) y los R de alrededor se indican por (i), (j), (k) y (l). Notese que los valores en los límites (sobre el marco rígido) no se cambian en ningún caso, permanecen siempre iguales a 0 (por ejemplo, así se ha hecho en (i)).

Pase E. continúese el proceso como en los pasos C y D hasta que todos los residuales se han reducido al menos a valores de  $\pm 2$ . Esto es todo cuanto resulta práctico reducir los residuales en este ejercicio.

Aunque teóricamente, todos los residuales deben reducirse a cero, en la práctica el cálculo se interrumpe poco antes de llegar a la solución perfecta. Cuando los residuales ehan sido reducidos al límite deseado, los valores de  $Z_{inc}$  en cada punto de la red deben sumarse algebraicamente para dar el valor final de Z en cada punto. Esto completa el cálculo. Como ejemplo (vease la Hoja Reticular de Verificación núm. 2) para el punto reticular 3,6 tenemos los incrementos de Z de 0, +10, +2, y -1 que algebraicamente totalizan +13 (sus incrementos pueden ser diferentes pero deben totalizar 13 ó un número próximo a él) como otro ejemplo, el punto reticular 6,6 tiene incrementos 0, -10, +5, -2, y -1, con un total de -8. Estos valores de Z son unidades de  $4 \times 10^{-2}$  pies/s. el proceso de relajación mostrado en la Hoja Reticular de verificación no significa que indique la selección más eficiente de los incrementos de Z, sino más bien lo que puede esperarse en un primer intento.

9.- El paso noveno consiste solamente en copiar los valores de la red de relajación (Hoja Reticular N° 2 en la columna 9 de la Hoja de Tabulación núm. 1. Por ejemplo, el valor de Z para el punto 3,3 es -1, que se escribe para dicho punto en la columna 9.

10.- En esta etapa se da el paso final del cálculo. Puesto que cada valor de Z escrito en la columna 9 está en unidades de  $4 \times 10^{-2}$  pies/s., simplemente dividiendo los valores de Z por 4 obtendremos las velocidades instantáneas de cambio de altura en unidades de  $10^{-2}$  pies/segundo. Sin embargo, podríamos querer el resultado en función de la velocidad instantánea de cambio en 12 horas, así debemos multiplicar por el número de segundos en 12 horas, ó, 43,200. Dividir por 4 y multiplicar por 43,200, por supuesto, es lo mismo que multiplicar por  $10.8 \times 10^3$ .

Así, debemos multiplicar cada valor de la columna 9 por  $10.8 \times 10^3$  y, será práctico redondear el número en centenas de pies. El resultado se escribe en la columna 10, en unidades de decenas de pies (-10 representa una velocidad instantánea de cambio de -100 pies por 12 horas).

Por ejemplo, el valor de Z para el punto reticular 3,5 es +13  $\times 10^{-2}$ . Entonces se realiza la multiplicación  $+13 \times 10^{-2} \times 10.8 \times 10^3$  y obtenemos +1404. Redondeando las centenas da -1400 pies que es -140 en decenas de pies que se escribe en la columna 10.

Estos valores pueden transcribirse en los puntos reticulares del mapa original y trazar después las isolneas de la tendencia instantánea de altura. Esto completa el cálculo del modelo barotrópico.

HOJA DE TABULACION N° 1.

[illegible]





CENTRO DE ANALISIS  
EJERCICIO DE PREDICCION NUMERICA

HOJA DE VERIFICACION DE LA  
HOJA DE TABULACION N° 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PUNTOS RETIC.	$H_N - H_S$	$\eta_N - \eta_S$	$H_E - H_W$	$\eta_E - \eta_W$	Col. 2 x Col. 5	Col. 3 x Col. 4	Col. 6 - Col. 7	Z	$\left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_{12}$ 10.8 x 10 <sup>3</sup> x Col. 9
	x 10 ft.	x 10 <sup>-4</sup> sec. <sup>-1</sup>	x 10 ft.	x 10 <sup>-4</sup> sec. <sup>-1</sup>	x 10 <sup>-3</sup> ft. sec.	x 10 <sup>-3</sup> ft. sec.	x 10 <sup>-3</sup> ft. sec.	4 x 10 <sup>-2</sup> ft. sec. <sup>-1</sup>	x 10 ft. / 12 hrs.
3,3	-17	+0.9	-98	+1.4	-24	-88	+64	-1	-10
3,4	-28	+1.3	-100	+0.7	-20	-130	+110	+2	+20
3,5	-21	-1.3	-113	+3.4	-71	+147	-218	+13	+140
3,6	-43	-0.8	-94	+3.2	-138	+75	-213	+11	+120
3,7	-64	+1.6	-52	+0.7	-45	-83	+38	+2	+20
3,8	-43	+0.3	-21	-0.9	+39	-6	+45	-1	-10
4,3	-11	+1.6	-79	+2.5	-28	-126	+98	-1	-10
4,4	-14	-0.7	-101	+4.8	-67	+71	-138	+8	+90
4,5	-29	-2.4	-103	+5.4	-157	+247	-404	+17	+180
4,6	-86	+2.2	-68	+2.5	-215	-150	-65	+8	+90
4,7	-106	+4.2	-35	+0.5	-53	-147	+94	0	0
4,8	-64	+0.9	-17	0	0	-15	+15	-1	-10
5,3	+11	-1.1	+26	-1.4	-15	-29	+14	-1	-10
5,4	-4	-1.6	+10	0	0	-16	+16	-1	-10
5,5	-54	+1.0	+9	-0.3	+16	+9	+7	0	0
5,6	-111	+4.1	+19	-2.0	+222	+78	+144	-4	-40
5,7	-115	+4.1	+7	-0.5	+58	+29	+29	-2	-20
5,8	-69	+1.0	-5	+0.6	-41	-5	-36	0	0
6,3	+6	-0.2	+104	-3.6	-22	-21	-1	-3	-30
6,4	+3	-1.8	+107	-4.1	-12	-193	+181	-10	-110
6,5	-38	-0.4	+103	-4.4	+167	-41	+208	-11	-120
6,6	-84	+2.4	+79	-3.4	+286	+190	+96	-8	-90
6,7	-82	+1.6	+38	-1.0	+82	+61	+21	-3	-30
6,8	-52	+0.1	+7	+1.2	-62	+1	-63	+1	+10
7,3	-2	-0.1	+87	-0.5	+1	-9	+10	-2	-20
7,4	-3	-0.8	+99	-1.5	+5	-79	+84	-7	-80
7,5	-26	+0.3	+102	-2.8	+73	+31	+42	-7	-80
7,6	-46	+0.7	+74	-1.5	+69	+52	+17	-5	-50
7,7	-43	-0.5	+38	+0.1	-4	-19	+15	-3	-30
7,8	-34	+0.1	+16	+0.2	-7	+2	-9	0	0
8,3	-14	+1.0	+54	+0.3	-4	+54	-58	+1	+10
8,4	-12	+0.5	+59	+0.1	-1	+30	-31	-1	-10
8,5	-13	-0.4	+59	-0.3	+4	-24	+28	-3	-30
8,6	-20	-0.5	+43	+0.4	-8	-22	+14	-2	-20
8,7	-24	-0.1	+26	+0.5	-12	-3	-9	-1	-10
8,8	-21	-0.1	+17	-0.3	+6	-2	+8	0	0



CENTRO DE ANALISIS  
EJERCICIO DE PREDICCIÓN NUMÉRICA  
HOJA RETICULAR Nº 1  
VALORES A 500 Mb.

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	848	826	797	760	740	766	811	841	862	866
②	860 -27 +0.1	835 43	792 43	737 43	719 44	764 43	813 43	843 43	864 43	873
③	867	835 40	+5 +1.1 792 41	737 41	713 41	763 41	817 41	850 40	871 40	879
④	879	848 38	809 38	+13 +1.4 748 38	708 38	758 38	815 38	867 38	874 37	884
⑤	889	864 35	820 35	751 35	717 36	760 36	820 35	862 35	879 35	887
⑥	898	871 32	830 33	777 33	762 33	796 33	841 33	870 32	884 32	893
⑦	907	889 30	863 30	837 30	828 30	844 30	866 30	882 30	892 29	899
⑧	917	904 27	894 27	883 28	877 28	878 28	884 28	894 27	901 27	906
⑨	921	912 25	906 25	901 25	897 25	896 25	900 25	903 25	908 24	913
⑩	919	915	911	907	904	904	906	909	913	919

CENTRO DE ANALISIS  
EJERCICIO DE PREDICCIÓN NUMÉRICA

HOJA DE VERIFICACIÓN DE LA  
HOJA RETICULAR N° 1  
VALORES A 500 Mb.

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩						
①	848	826	797	760	740	766	811	841	862							
②	860 +0.1	-27 43	835 +0.8	-7 43	792 +3.0	737 +3.6	+78 44	719 +1.2	764 +0.5	-17 43	813 +0.9	-4 43	843 +0.8	-7 43	864	873
③	867 +1.0	+2 40	835 +1.1	-7 41	792 +2.4	737 +3.6	+75 41	713 +1.0	763 41	-27 0.0	817 +0.5	-12 40	850 +0.3	-17 40	871	879
④	879 +0.7	-5 38	848 -0.1	-28 38	809 +1.4	748 +4.7	+104 38	708 +1.4	758 38	-8 +0.6	815 38	-27 -0.1	857 38	-5 +0.7	874 37	884
⑤	889 -0.3	-28 35	864 -0.2	-26 35	820 +3.1	751 +5.2	+113 36	717 +2.8	760 36	-2 +0.8	820 35	-22 0.0	862 35	-9 +0.5	879 35	887
⑥	898 +0.6	-3 32	871 +1.2	+11 33	830 +3.8	777 +3.7	+70 33	762 +1.8	796 33	-12 +0.3	841 33	-11 +0.3	870 32	-2 +0.7	884 32	893
⑦	907 +0.2	-11 30	889 +0.6	-2 30	863 +0.9	837 +1.1	+8 30	828 +0.4	844 30	-13 +0.1	866 30	-6 +0.5	882 30	-2 +0.6	892 29	899
⑧	917 +0.5	-4 27	904 -0.4	-20 27	894 -0.4	883 -0.4	-22 28	877 +0.2	878 28	+2 +0.8	884 28	-6 +0.4	894 27	-4 +0.5	901 27	906
⑨	921 +0.5	-2 25	912 +0.3	-6 25	906 0.0	901 +0.1	-10 25	897 +0.3	896 25	-11 0.0	900 25	-1 +0.6	903 25	-2 +0.5	908 24	913
⑩	919	915	911	907	904	904	906	909	913	919						



CENTRO DE ANALISIS  
EJERCICIO DE PREDICCIÓN NUMÉRICA  
HOJA DE TABULACION N° 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PUNTOS RETIC.	$H_{TN}-H_{TS}$	$\eta_{TN}-\eta_{TS}$	$H_{TE}-H_{TW}$	$\eta_{TE}-\eta_{TW}$	Col.2 x Col.5	Col.3 x Col.4	$\frac{1}{2}(Col.6-Col.7)$	Col.8 de hoja Tabulación n°1	Col.8 + Col.9	Z	$\left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_{12}$ 10.8 x 10 <sup>3</sup> x COL 11
	x10 ft	$\frac{-4}{10} \frac{+1}{sec}$	x10 ft	$\frac{-4}{10} \frac{-1}{sec}$	$\frac{-3}{10} \frac{-1}{sec}$	$\frac{-3}{10} \frac{-1}{sec}$	$\frac{-3}{10} \frac{-1}{sec}$	$\frac{-3}{10} \frac{-1}{sec}$	$\frac{-3}{10} \frac{-1}{sec}$	$\frac{-2}{4 \times 10} \frac{-1}{ft \ sec}$	x10 ft /12 h.
3,3	- 4	+ 0.3	- 102	+ 2.2	- 9	- 31	+ 6	+ 64	+ 70	- 1	- 10
3,4								+ 110			
3,5								- 218			
3,6	- 62	+ 0.7	- 69	+ 2.4	- 149	- 48	- 25	- 213	- 238	+ 13	+ 140
3,7								+ 38			
3,8								+ 45			
4,3								+ 98			
4,4								- 138			
4,5								- 404			
4,6								- 65			
4,7								+ 94			
4,8								+ 15			
5,3								+ 14			
5,4								+ 16			
5,5								+ 7			
5,6								+ 144			
5,7								+ 29			
5,8								- 36			
6,3								- 1			
6,4								+ 181			
6,5								+ 208			
6,6								+ 96			
6,7								+ 21			
6,8								- 63			
7,3								+ 10			
7,4								+ 84			
7,5								+ 42			
7,6								+ 17			
7,7								+ 15			
7,8								- 9			
8,3								- 58			
8,4								- 31			
8,5								+ 28			
8,6								+ 14			
8,7								- 9			
8,8								+ 8			

CENTRO DE ANALISIS  
EJERCICIO DE PREDICCION NUMERICA  
HOJA RETICULAR N° 2

	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0	0						
3	0	+6						
4			-14					
5				+1				
6								
7								
8								
9								

CENTRO DE ANALISIS  
EJERCICIO DE PREDICCIÓN NUMÉRICA

HOJA DE VERIFICACIÓN DE LA  
HOJA RETICULAR N° 2

	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	-1 -5 -4 0	-1 -3 -2 0	-2 -1 -5 -4 0	-1 0 +2 -10 0	-2 -1 -2 -1 -9 -6 0	-1 +3 +4 0	0
4	0	+1 0 +1 +3 +1 +9 -1 0	+1 0 +1 -7 -9 -2 +10 0	+1 0 -1 0 -4 -2 +8 0	0 +1 +3 +4 +7 +12 -28 0	+1 -3 -2 -1 -5 -18 0	+1 -6 -2 -1 0 -1 -2 0	0
5	0	+2 0 +11 0 +1 +7 +2 +10 0	+2 0 +11 0 +1 +7 +2 +10 0	+2 0 +11 0 +1 +7 +2 +10 0	+18 -4 -3 -1 +4 -1 +9 +19 0	+8 -1 -5 -4 -2 -1 -19 -4 -5 0	-3 -1 -3 -2 -1 0 -8 -3	0
6	0	+13 +3 +2 +1 -1 +1 +1 +10 0	+13 +3 +2 +1 -1 +1 +1 +10 0	+13 +3 +2 +1 -1 +1 +1 +10 0	+21 +1 -7 -5 -3 -1 -9 -2 +5 -10 0	+4 -5 -4 -2 0 -1 -12 -4 -7 -3 -12 -2 0	+3 -2 -1 -5 -4 -3 -2 -1 -4 -1 0	0
7	0	+11 -2 -1 +3 +1 +2 +1 0	+11 -2 -1 +3 +1 +2 +1 0	+11 -2 -1 +3 +1 +2 +1 0	+10 -2 -1 -3 -1 -7 -12 -2 0	+2 -3 -1 -5 -4 -2 -1 +1 0	+1 0 +1 -3 -2 -1 0 +1 0	0
8	0	-1 0 -4 0	-1 0 -4 0	-1 0 -4 0	+1 -6 0	0 +1 0	0 +1 0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0